

# **Задачи моделирования технологий ядерного топливного цикла. Платформа АТЭК**

*Инга Равильевна Макеева,*

*Н.Д. Дырда, С.В. Пчелинцева, А.А. Рыкунова,*

*В.А. Симоненко, Ю.Г. Сырцова*

*XIII Забабахинские научные чтения*

*20-24 марта 2017 г., Снежинск*

# Задачи и развилки в развитии АЭ

Переход с  $U^{235}$   
на  $U^{238}$

- Создание перспективных типов реакторов на быстрых нейтронах
- Создание технологий замыкания ядерного топливного цикла для РБН

Решение  
отложенных  
проблем  
предыдущего  
этапа  
развития ЯЭ

- Переработка накопленного ОЯТ тепловых реакторов
- Вовлечение рециклированных материалов в топливный цикл
- Вывод объектов из эксплуатации
- Экологически приемлемое обращение с РАО

- Тепловые;
- Быстрые – разные теплоносители
- Коэффициент воспроизводства

Темп  
развития,  
Типы  
реакторов

Переработка  
или  
хранение

- Гидрометаллургия
- Пирохимия...
- Хранение ОЯТ или плутония?

Топливо

Источники  
ДМ

- повышенное выгорание топлива
- Мох
- REMIX
- СНУП

- Уран, торий
- плутоний ТР,
- плутоний БР

# Задачи моделирования

**Моделирование развития отрасли и её подсистем  
в ближне-, средне- и долгосрочной перспективе**

Оценка возможностей по наращиванию энерго мощностей в зависимости от производственной базы и инвестиционных ресурсов

Согласованные потребности в производственных мощностях

Оптимизация сроков ввода производств в эксплуатацию

Оценка материальных и финансовых ресурсов

Определение требований к технологиям

## Технико-экономические модели

### Экономические модели

Экономические характеристики

Подготовка финансовых планов

Расчет тарифов

### Технологические модели

Потребности в ресурсах

Расчет жизненного цикла объектов

### Логистические модели

Моделирование транспортно-технологических схем

Оптимизация инфраструктурных потребностей

### Модели технологических процессов и аппаратов

Принципиальная реализуемость ТП

Оптимизация технологических режимов

Оценка безопасности

# Платформа АТЭК для моделирования технологий ЗЯТЦ



- РФЯЦ-ВНИИФ (Снежинск)
- ГНЦ Курчатовский институт (Москва),
- НПО ВНИИНМ им. акад. А.А. Бочвара (Москва),
- НПО РИ им. В.Г. Хлопина (С. Петербург),
- НПО ВНИИХТ (Москва),
- НИИАР (Дмитровград),
- ФЦЯРБ (Москва),
- ГИ ВНИПИЭТ (С. Петербург),
- ФЭИ (Обнинск),
- НИКИЭТ (Москва),
- ПО Маяк (Озёрск),
- ФГУП «ГХК» (Железногорск)

# Компоненты комплекса



# АТЭК. Особенности моделирования

Описание характеристик материального потока (химический, нуклидный составы, активности, количество) в зависимости от времени

Описание функционирования узлов и аппаратов с точки зрения эксплуатации в заданных условиях – сроки эксплуатации, потребности и периодичности профилактики, коррозионный износ и т.п.

Описание экономических характеристик технологий и соответствующих производств

Описание физико-химических процессов в отдельных узлах и аппаратах с различной степенью точности от инженерной до первопринципной на уровне физико- и химико-математических моделей процессов

# Учёт нуклидных составов при оценке безопасности

**Оценка уровней активности и тепловыделения, особенно при рефабрикации топлива из ОЯТ;**

**Описание накопления продуктов деления и актинидов, в частности, плутония в отдельных аппаратах, емкостях, фильтрах и т.п.**

**Оценка рисков выбросов радиоактивности при проектных и запроектных авариях;**

**Определение вероятности проектных аварий в зависимости от принятых технических решений и характеристик обрабатываемого потока.**

# Современное состояние АЭ

10 действующих АЭС

35 энергоблоков, установленная мощность  
26,6 ГВт

Доля АЭ – 18,6%

Основа ЯЭ – тепловые реакторы (РБМК –  
11, ВВЭР-1000 – 12, ВВЭР-440 – 6)

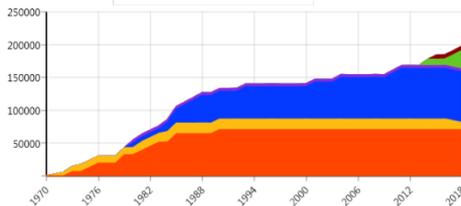
Два РБН – БН-600, БН-800

Перерабатывается ОЯТ ВВЭР-440 и БН-600

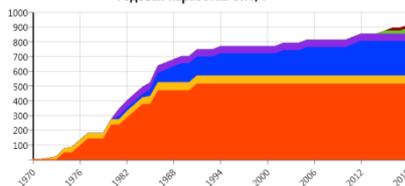
Ежегодная наработка ОЯТ  $\approx 900$  т

$\approx 22\,000$  т ОЯТ РФ находится на хранении

Производство электроэнергии, ГВт\*ч

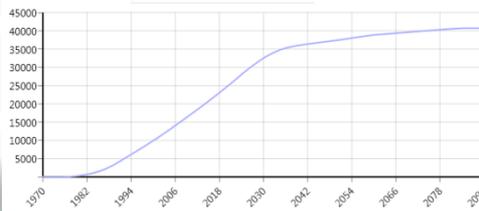


Годовая наработка ОЯТ, т

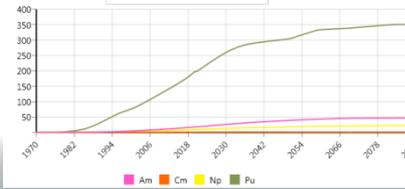


*Если остановить ввод новых энергоблоков, то к 2090 г. на хранении останется  $\approx 41$  тыс. т ОЯТ, где содержится 350 т Pu*

Количество ОЯТ на хранении, т

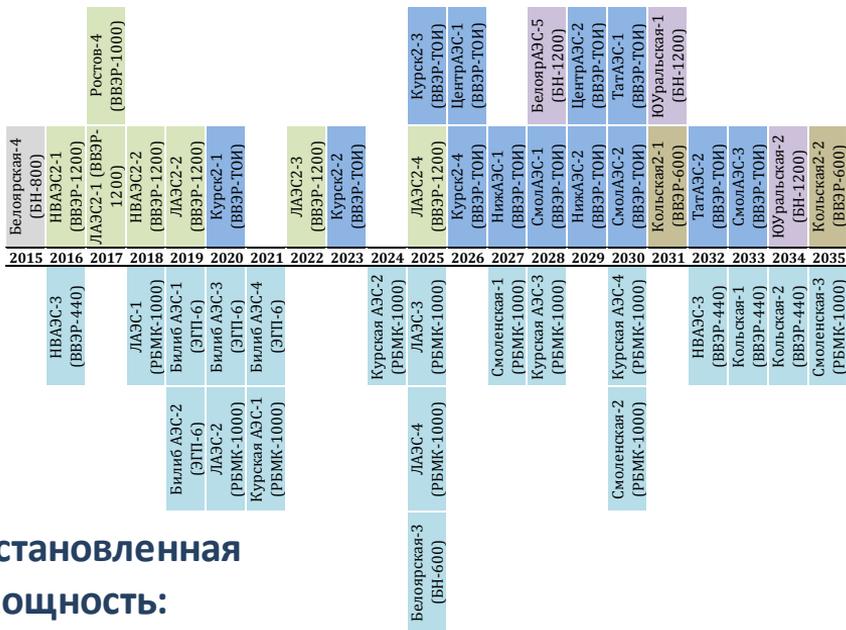


Количество тяжелых элементов в ОЯТ, т



# Дорожная карта и варианты развития

## Варианты наращивания энергомощности



### Тепловые реакторы

открытый ТЦ

замыкание по Pu и U

### Реакторы на быстрых нейтронах

выбор Кв

пристанционная или централизованная переработка

использование Pu тепловых реакторов

Все варианты могут быть промоделированы с использованием ПК АТЭК

Установленная мощность:  
к 2035 году: 45 ГВт  
к 2100 году: 92 ГВт

- Схема территориального планирования Российской Федерации в области энергетики,  
Распоряжение правительства РФ от 1 августа 2016 г. № 1634-р  
- Приказ Минэнерго Правительства РФ от 1 марта 2016 года № 14



# Уровни моделирования в комплексе АТЭК

## Стратегический уровень

- Оптимизация ввода перспективных и действующих реакторов и объектов ЗЯТЦ
- Оценка ресурсного обеспечения – сырьевого, производственного, финансового
- Оценка потребностей в инфраструктуре ЯТЦ

## Системный уровень

- Согласование взаимодействия технологий,
- Текущее планирование – текущие ресурсы, продукция, отходов (хранилища, склады, хранилища и захоронения РАО)
- Экономические характеристики объектов ЯТЦ

## Технологический и производственный уровни

- Выбор оптимальных аппаратурных и технологических решений
- Сопровождение разработки и внедрения технологий
- Оценка безопасности, экологических характеристик

# Система моделирования

1 Планируемая энергомощность

2 Выбор типов РУ

3 Открытый или замкнутый ТЦ?

4 Оценка ресурсов

5 Потребности в производствах ЯТЦ

6 Потребности в инфраструктуре

7 Выбор технологий

8 Экономические характеристики и оценка стоимости

9 Определение компоновок ТЛ

10 Аппаратные реализации технологий

1 – 5, 7, 8 АТЭК

5 – 8 ЛогОЯТ

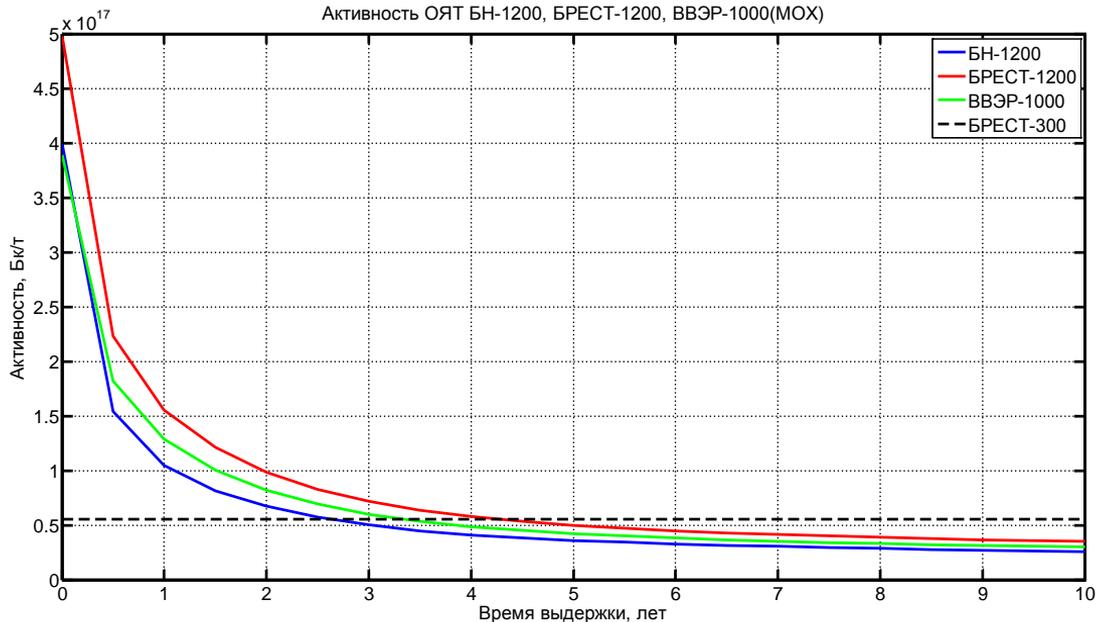
7, 9, 10 ВИЗАРТ

8 ОДЦ

# Перспективные типы реакторных установок

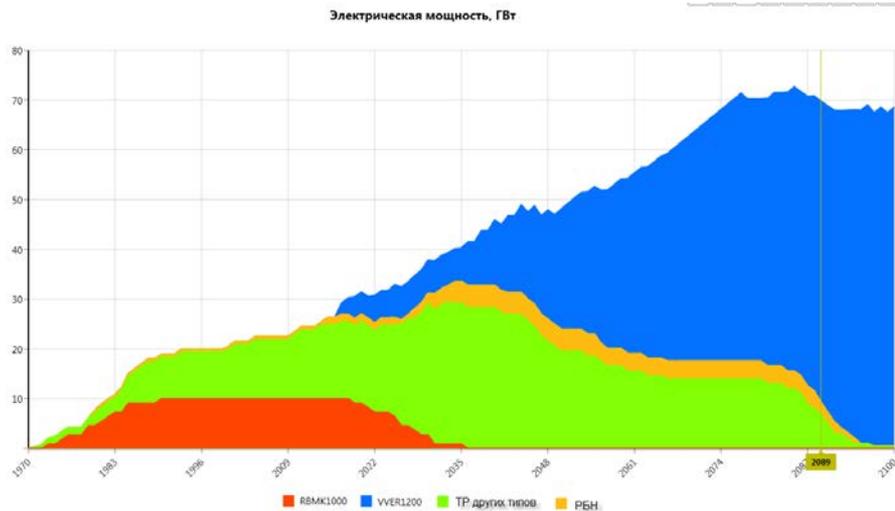
Тип РУ	Характеристики РУ	Топливо	Технология переработки	КВ	Тип переработки
ВВЭР-1200	тепловой водо-водяной	урановое или смешанное оксидное	варианты ПУРЭКС-процесса	<1	3-5 лет выдержка, централизованный
БН-1200	быстрый натриевый	смешанное оксидное или нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро)	1,13-1,3	1-7 лет выдержка, централизованный или пристанционный
БРЕСТ-1200	Быстрый свинцовый	смешанное нитридное	варианты ПУРЭКС-процесса, комбинированная (пиро+гидро)	1,05	1-2,5 года выдержка, пристанционный

# Активности ОЯТ

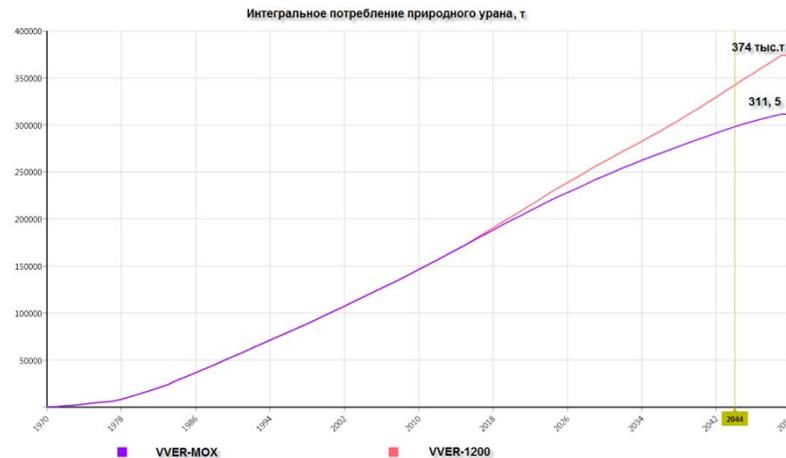


**Время охлаждения до переработки**  
**БН-1200 – 3 года**  
**ВВЭР-мокс – 4 года**  
**БРЕСТ-1200 – 5 лет**

# Сценарные варианты



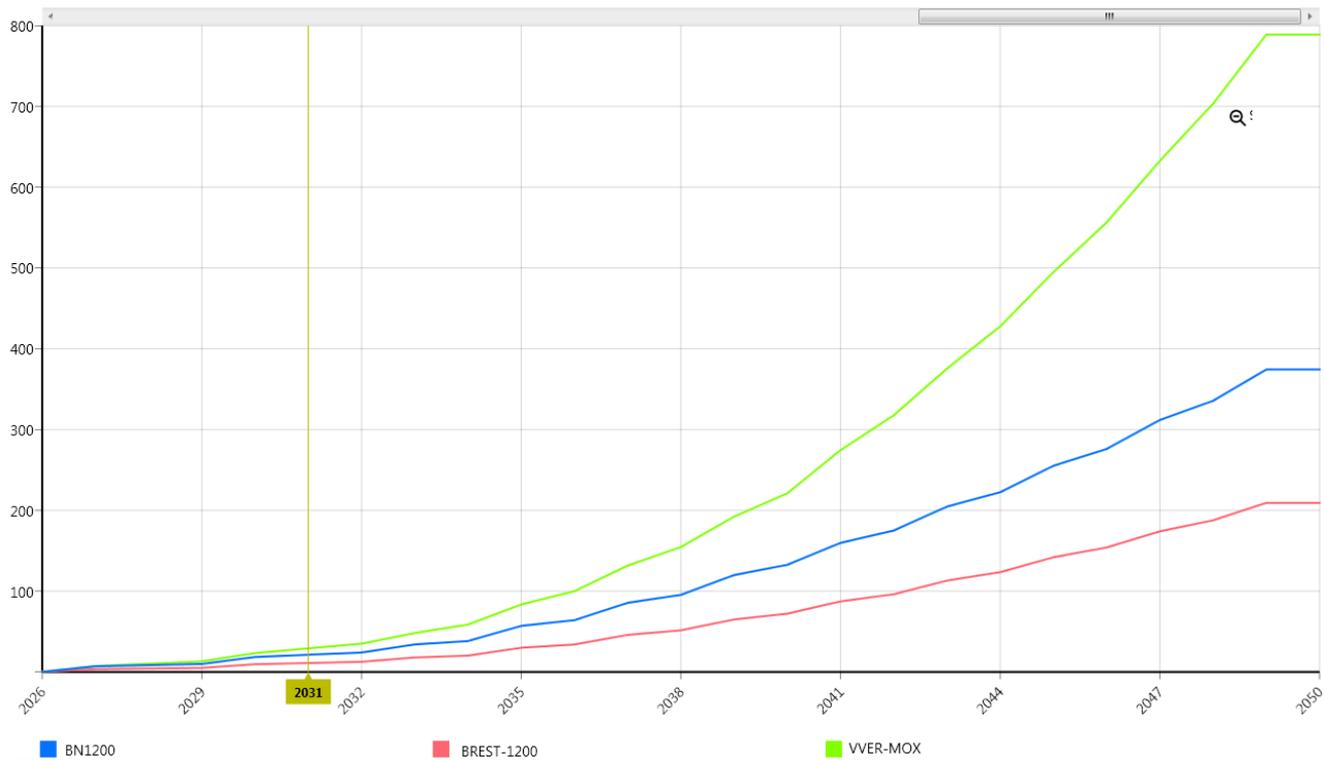
До 2035 – в соответствии с дорожной картой  
После 2035 г. – ввод ВВЭР-1200 1 блок в год  
Суммарная энергомощность  $\approx 70$  ГВт (эл.)



После 2035 г. – ввод ВВЭР-мокс  
 $\Delta \approx 62,5$  тыс.т или 16%

# Сценарные варианты. Потребление Pu

Интегральное потребление плутония, т



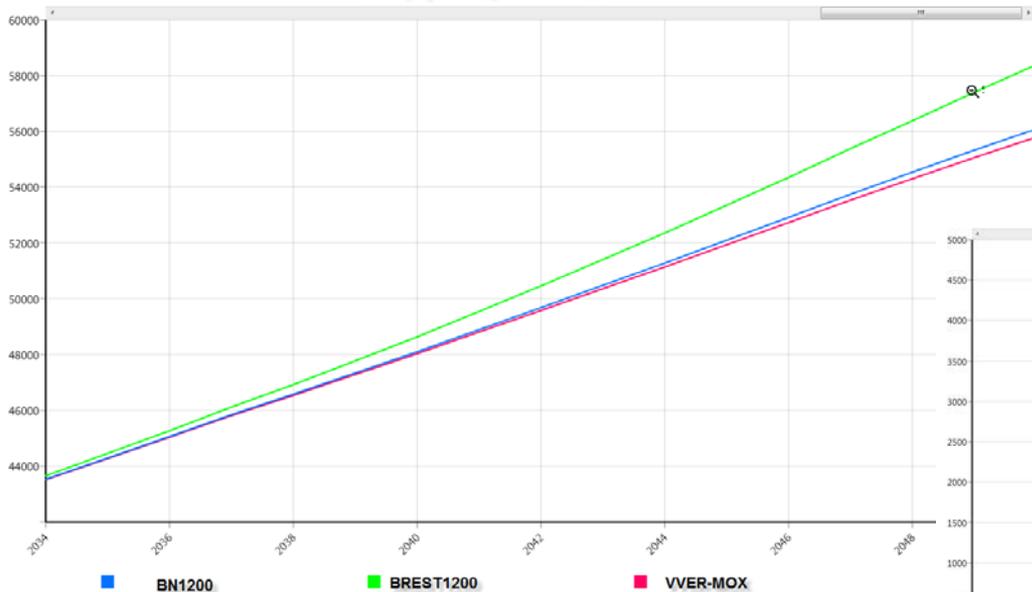
■ BN1200

■ BREST-1200

■ VVER-MOX

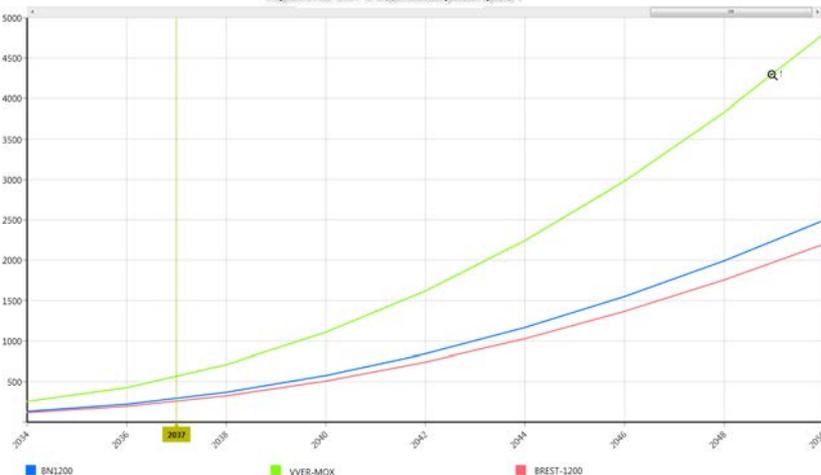
# Сценарные варианты. Нарботка ОЯТ

Интегральная наработка ОЯТ, т



Ежегодная наработка ОЯТ  $\approx$  1000 т

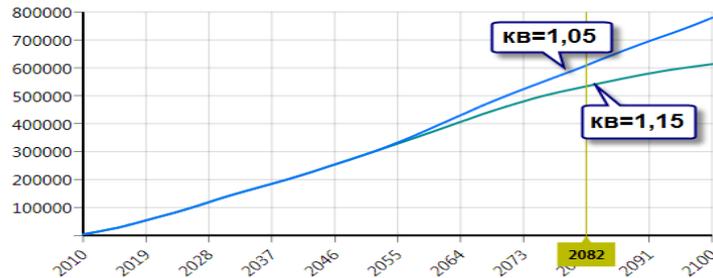
Нарботка ОЯТ в отдельных реакторах, т



Потребности в переработке ОЯТ перспективных реакторов:  
500 т/год – ВВЭР-мокс, 250 т/год - РБН

# Развитие энергетики на БР с кв=1,05

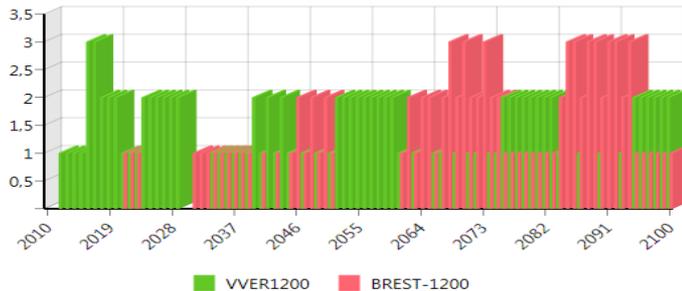
**Интегральное потребление природного урана, т**  
расчет: StrategyProgressive1\_1 (БРЕСТ опт.)



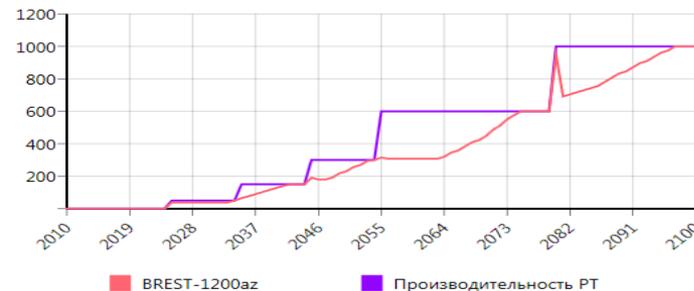
**Запас сырья, т**  
расчет: StrategyProgressive1\_1 (БРЕСТ опт.)



**Вводимые, шт**  
расчет: StrategyProgressive1\_1 (БРЕСТ опт.)

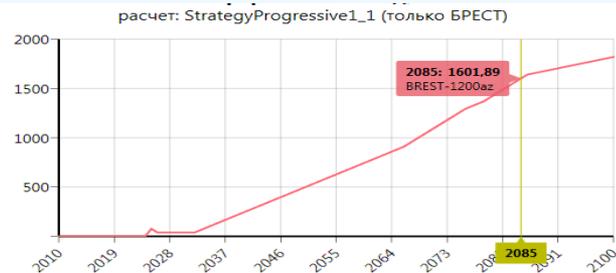


**Переработано в год, т**  
расчет: StrategyProgressive1\_1 (БРЕСТ опт.)



- В 2100 г. 75 блоков БРЕСТ, 58 блоков ВВЭР-1200
- Потребность в переработке ОЯТ БРЕСТ – 1000 т т.м. в год
- Разница в потреблении природного урана составляет  $\approx 250$  тыс. т (на 2100 г.)

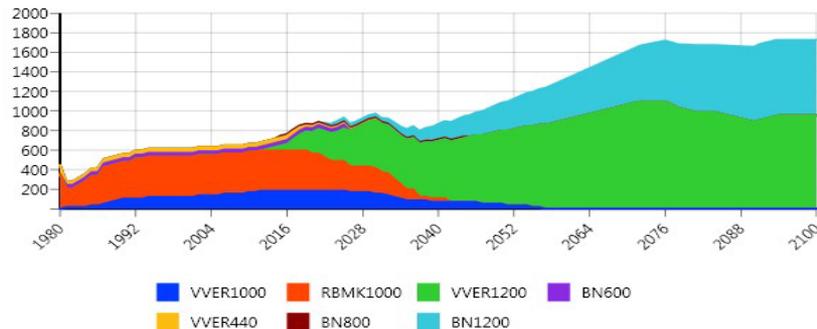
# Ввод только БР с кв=1,05 после 2030 г.



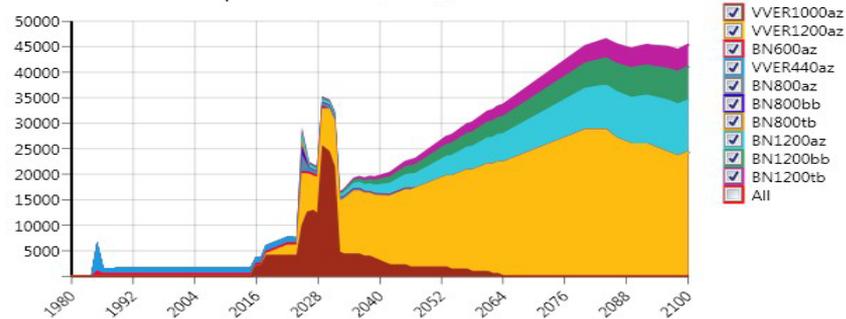
Дефицит плутония  $\approx 1000$  т (к 2100 г) или  
потребление природного урана  $\approx 195$  тыс. т  
Необходимая мощность переработки ОЯТ БР – 1800 т т.м.

# Экономические характеристики.

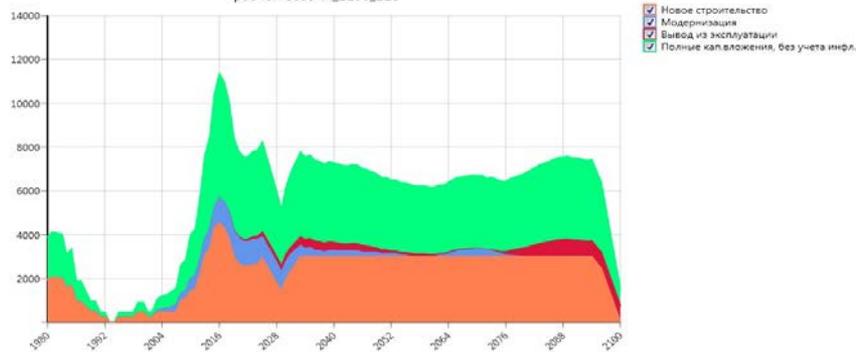
Стоимость производства топлива, млн. руб  
расчет: BaseRA\_2100\_11c



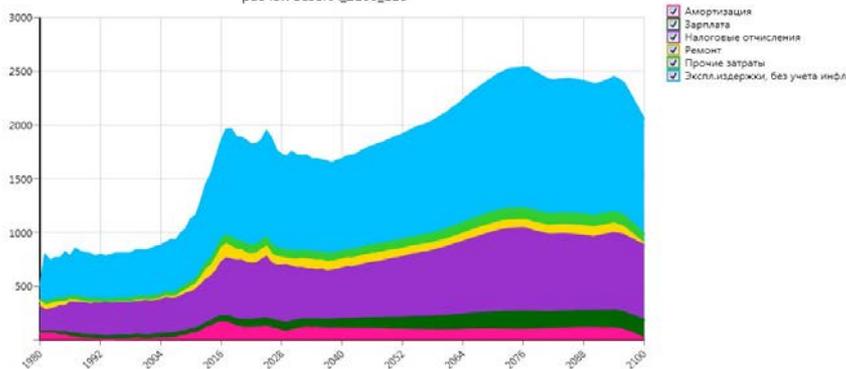
Стоимость переработки ОЯТ в год, млн. руб  
расчет: BaseRA\_2100\_11c



Полные кап.вложения в АЭС, без учета инфл., млн. руб  
расчет: BaseRA\_2100\_11c



Эксплуатационные издержки АЭС, млн. руб  
расчет: BaseRA\_2100\_11c



# ЛогОЯТ – системный уровень

Основная цель – расчет тарифа на обращение с ОЯТ с учетом потребностей в объектах инфраструктуры и транспорта

Расчет жизненного цикла объектов ЯТЦ

Учет транспортных перевозок

Расчет всех характеристик системы на основе планируемого материального потока

Оптимизация инфраструктуры обращения с ОЯТ и транспортного оборота на основе критерия экономической эффективности

Моделирование БД и документы ТТС Настройки

Запросы к БД, отчеты, справочные запросы | Учет отливок ОТВС | Коллекция презентаций по ЯТЦ | Веб-сайт по ЯТЦ | Справочные документы

транспорти

Используемые вагоны-контейнеры(транспортеры)  
(выберите строку с вагоном - получите соответствующий вагону тук)

Наимен.	Дата ввода	Год ввода	План работа	Парк	Приниска	Год модер.	Продление	Загрты на испл.	Загрты на рейс	Загрты на проектные и ИЮКР
TK-6	1960-1966	2015	35	11	ПО "Маяк"	0	0	0	0	0
TK-13	1987-1991	2011	20	12	ГЛК	0	0	0	0	0
TK-10	1983-1985	2011	20	12	ГЛК	0	0	0	0	0
TK-109	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
TK-11	1963-1987	2011	20	7	ПО "Маяк"	0	0	0	0	0
TK-6	1990	0	20	16	ПО "Маяк", СФ ИЮКР	0	0	0	0	0
TK-6Г-18	1994	0	25	3	ПЦЦ РФ-НИИЯР	0	0	0	0	0
TK-6Г-18	1988-1989	0	25	52	ПО "Маяк"	0	0	0	0	0
TK-6	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
TK-18	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
TK-6Г-11	1988-1989	0	0	0	-	0	0	0	0	0

Существующие вагон-контейнеры данного типа.

Заводской номер вагона	Наимен.	Дата ввода	Год ввода	План работа	Год модер.	Продление	Парк	Загрты на испл.	Загрты на рейс	Загрты на проектные и ИЮК
39525001	TK-6	1979	0	35	0	0	15	0	16	10
39525019	TK-6	1979	0	35	0	0	16	0	16	10
39525027	TK-6	1979	0	35	0	0	16	0	16	10
39525035	TK-6	1982	0	35	0	0	16	0	16	10
39525043	TK-6	1982	0	35	0	0	16	0	16	10
39525050	TK-6	1984	0	35	0	0	16	0	16	10
39525068	TK-6	1984	0	35	0	0	16	0	16	10
39525076	TK-6									
39525084	TK-6									
39525092	TK-6									
39525100	TK-6									

Варьируемые параметры

Реакторные блоки – сроки эксплуатации, ввод новых, ежегодная наработка ОЯТ  
Даты ввода и сроки эксплуатации хранилищ, производительность узла приемки, производительности и год ввода в эксплуатацию узлов разделки ОТВС на станциях  
Максимальное количество рейсов эшелона в год, сроки эксплуатации МБК ТУК-109, эшелонов

Дата ввода в эксплуатацию и производительность переработки

# Пример расчета

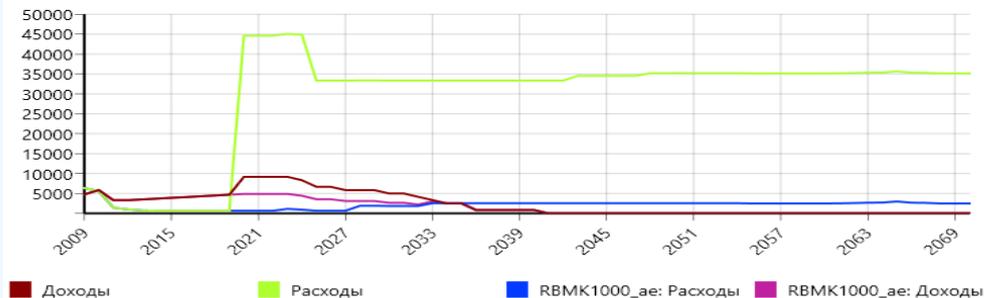
### Количество ОТВС, шт

расчет: RBMK1000\_ae\_Rc



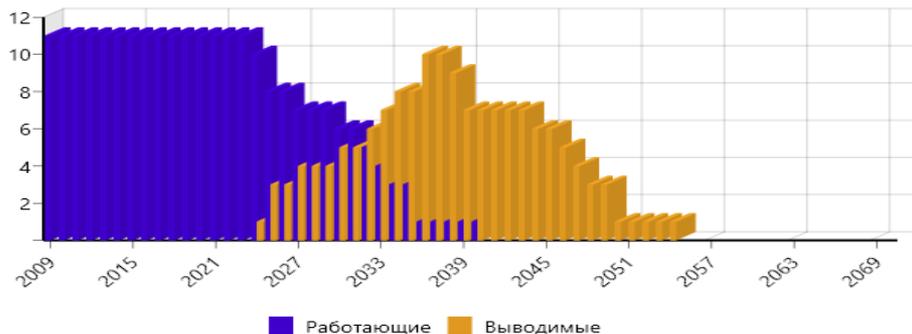
### Доходы и расходы, млн. руб

расчет: RBMK1000\_ae\_Rc



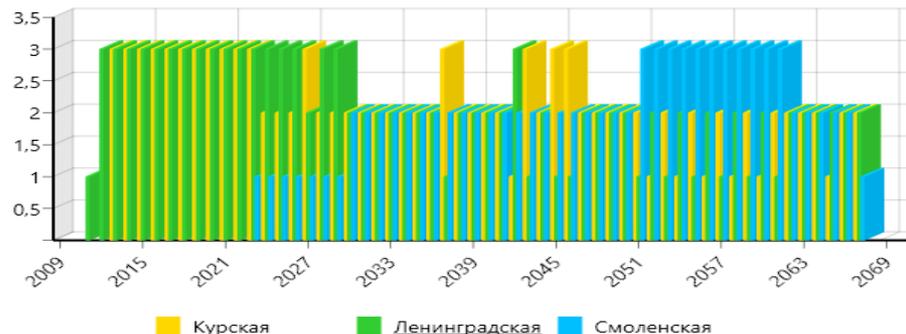
### RBMK1000, шт

расчет: RBMK1000\_ae\_Rc



### Количество рейсов эшелонов в год, шт

расчет: RBMK1000\_ae\_Rc

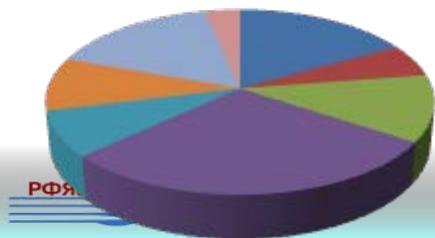


# Оценка экономических характеристик производств - ОДЦ

Моделирование переработки различных типов ОЯТ на ОДЦ ФГУП «ГХК»

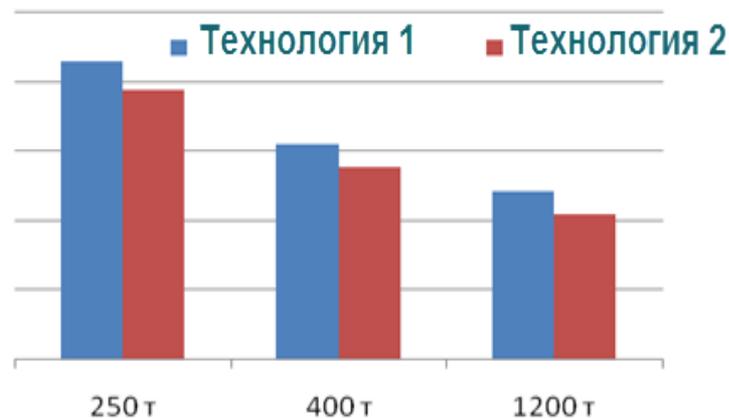
Определены стоимости переработки для различных вариантов технологии в зависимости от производительности

Определена структура затрат: максимальный вклад – обращение с РАО



- Материалы
- Электроэнергия технологическая
- Оплата труда
- Амортизационные отчисления
- Общепроизводственные расходы
- Общехозяйственные расходы
- Расходы на вывод из эксплуатации
- Оплата национальному оператору

Изменение стоимости переработки в зависимости от производительности



# Задачи моделирования при разработке и обосновании технологических переделов ЗЯТЦ

- Обоснование реализуемости технологических решений
- Подготовка исходных данных
- Оценка и оптимизация решений по компоновке технологических линий с точки зрения предъявляемых требований по производительности, согласованности работы переделов, динамике наработки промежуточных и конечных продуктов
- Оценка накопления ДМ и ЯМ на различных технологических переделах, в промежуточных хранилищах и емкостях – исходная информация для оценки безопасности и соответствия критериям нераспространения
- Оценка объемов и типов образующихся РАО
- Выбор и оптимизация режимов технологических процессов
- Оценка влияния технологических режимов на состав и качество промежуточных и конечных продуктов

# Задачи ПК ВИЗАРТ

Расчет материального  
баланса в  
стационарном режиме

- принципиальная реализуемость ТП,
- подготовка исходных данных
- оценка объемов РАО в «идеальном» случае

Расчет материального  
баланса в  
динамическом режиме  
с учетом эволюции  
нуклидных составов

- оптимизация решений по организации ТЛ
- построение циклограмм работы оборудования
- оценка накопления ДМ на узлах и переделах ТЛ
- оценка уровней активности и тепловыделения материальных потоков

Моделирование  
отдельных  
технологических  
процессов и аппаратов

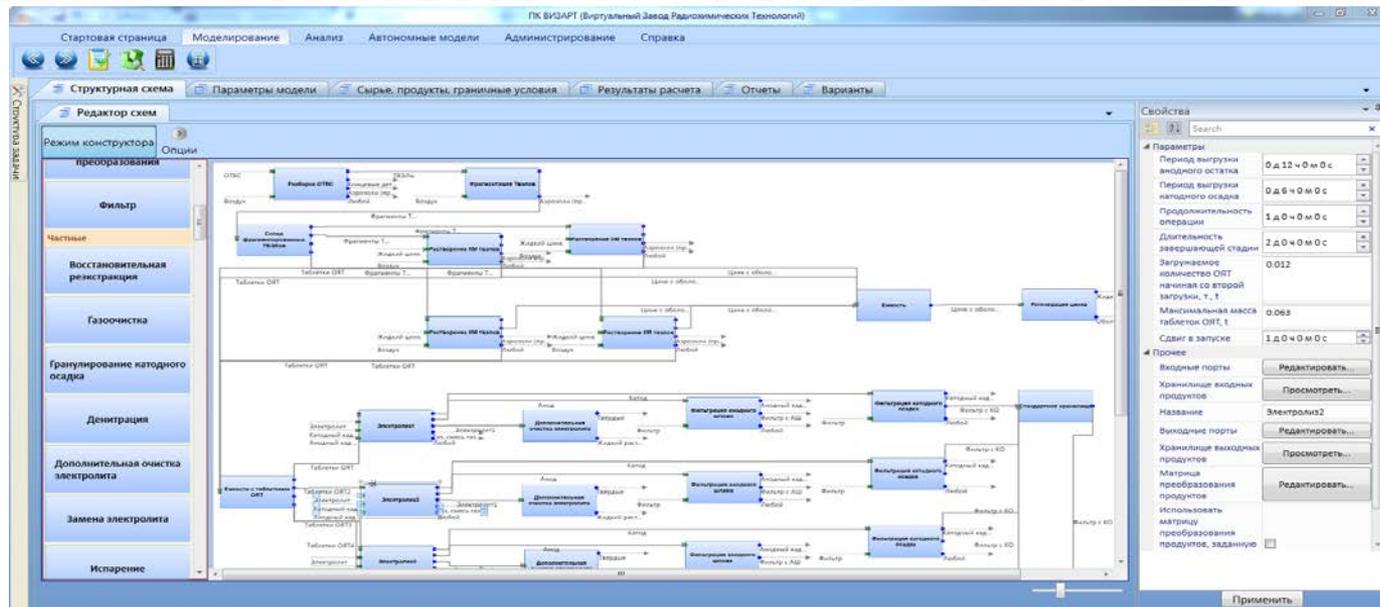
- выбор технологических режимов
- оптимизация технологических процессов
- определение параметров процессов и характеристик оборудования для использования при расчете материального баланса

# Пользовательский интерфейс для создания технологической схемы

- Создание схемы технологической линии из узлов библиотеки моделей

- Изменение параметров узлов

- Выбор типа расчета и проведение расчетов



- Сохранение расчетного варианта
- Визуализация результатов
- Подготовка отчетных документов

# Результаты расчета материального баланса в статическом режиме

Структурная схема | Параметры модели | Сырье, продукты, граничные условия | **Результаты расчета** | Отчеты | Варианты

Результаты по узлам | Результаты по всей задаче | Циклограммы | Выходной файл

### Результаты расчета для узла: «Электролиза»

Выходные параметры узла

Входные потоки

Название	Масса, тонны	Плотность кг/м3	Тип дисперсной системы	Фаза	Тип компонента
Электролит	1,09	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Катодный кадмий	4,6	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Анодный кадмий	0,02	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Таблетки ОТ	0,508	726748,313	Неопределен	Твердое вещество	Тип продукта
UN	0,405	0		Твердое вещество	Хим. соединение
PuN	0,076	0		Твердое вещество	Хим. соединение
AmN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение
CmN	8,252E-005	0		Твердое вещество	Хим. соединение
NpN	6,367E-005	0		Твердое вещество	Хим. соединение
LuN	0,001	6730		Твердое вещество	Хим. соединение
CeN	0,002	0		Твердое вещество	Хим. соединение
PvN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение
NdN	0,003	0		Твердое вещество	Хим. соединение
PmN	1,258E-004	0		Твердое вещество	Хим. соединение
SmN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение

Структурная схема | Параметры модели | Сырье, продукты, граничные условия | **Результаты расчета** | Отчеты | Варианты

Дерево узлов

- Выбрать все узлы
- Снять выделение
- Разборка ОТВС
- Фрагментация твэлов
- Растворение КМ твэлов
- Электролиза
- Фильтрация анодного шлама
- Очистка соли №1
- Фильтрация катодного осадка
- Очистка соли №2
- Кристаллизационная очистка соли
- Отгонка Cd

Химический состав

Изотопный состав

Масса ОЯТ, т 1

Время работы, г 1

Производительность, т, 1

Разделить таблицу на элементы и химические вещества

Выбрать все

Снять выделение

- Sb
- Te
- Kr
- Xe
- He
- I2
- H2
- Zn

Код продукта	Имя	Производительность по потоку		Плотность кг/м <sup>3</sup>	Элементы							
		кг/т ОЯТ	м3/т ОЯТ		N2 кг/т ОЯТ	O2 кг/т ОЯТ	Ag кг/т ОЯТ	ТВЭЛы кг/т ОЯТ	Rb кг/т ОЯТ	Cs кг/т ОЯТ	Se кг/т ОЯТ	
Air_5	Воздух	2,00E+002	1,12E-001	1,78E+000	155,0000	35,0000	10,0000					
OTVS_4	ОТВС	1,00E+003	0	бесконечность				713,4511				
Tvels_5	ТВЭЛы	7,13E+002	2,59E-005	2,75E+004								
Tails_1	Концевые детали	2,87E+002	0									
Aerosol_4	Аэрозоли (производные от газов)	2,01E+002	1,53E-001	1,31E+000								
Air_7	Воздух	2,00E+002	0	бесконечность	155,0000	45,0000						
Tvels_5	ТВЭЛы	7,13E+002	2,59E-005	2,75E+004								
FragmentTvels_19	Фрагменты ТВЭЛов	7,12E+002	2,59E-005	2,75E+004							0,0153	0,2837
Aerosol_17	Аэрозоли (производные от газов)	2,01E+002	1,55E-001	1,29E+000								0,0028
Air_1	Воздух	2,00E+002	1,12E-001	1,78E+000	155,0000	35,0000	10,0000					

Масса кг/т ОЯТ | Объем м3/т ОЯТ | Активность Бк | Тепловыделение Вт | Сформировать отчет

Перейти к созданию отчетов

# Расчеты переработки ОЯТ перспективных типов реакторов

- Рассматриваемые варианты переработки:
  - комбинированная (пиро+гидро)
  - гидрометаллургическая (ПУРЭКС-процесс)
- Активность раствора ОЯТ на ЭКП зависит от типа ОЯТ, времени выдержки, варианта переработки
- влияет на количество рефлаксного урана и, соответственно, на объемы раствора на ЭКП и количество образующихся РАО

# Расчет ТС в динамическом режиме

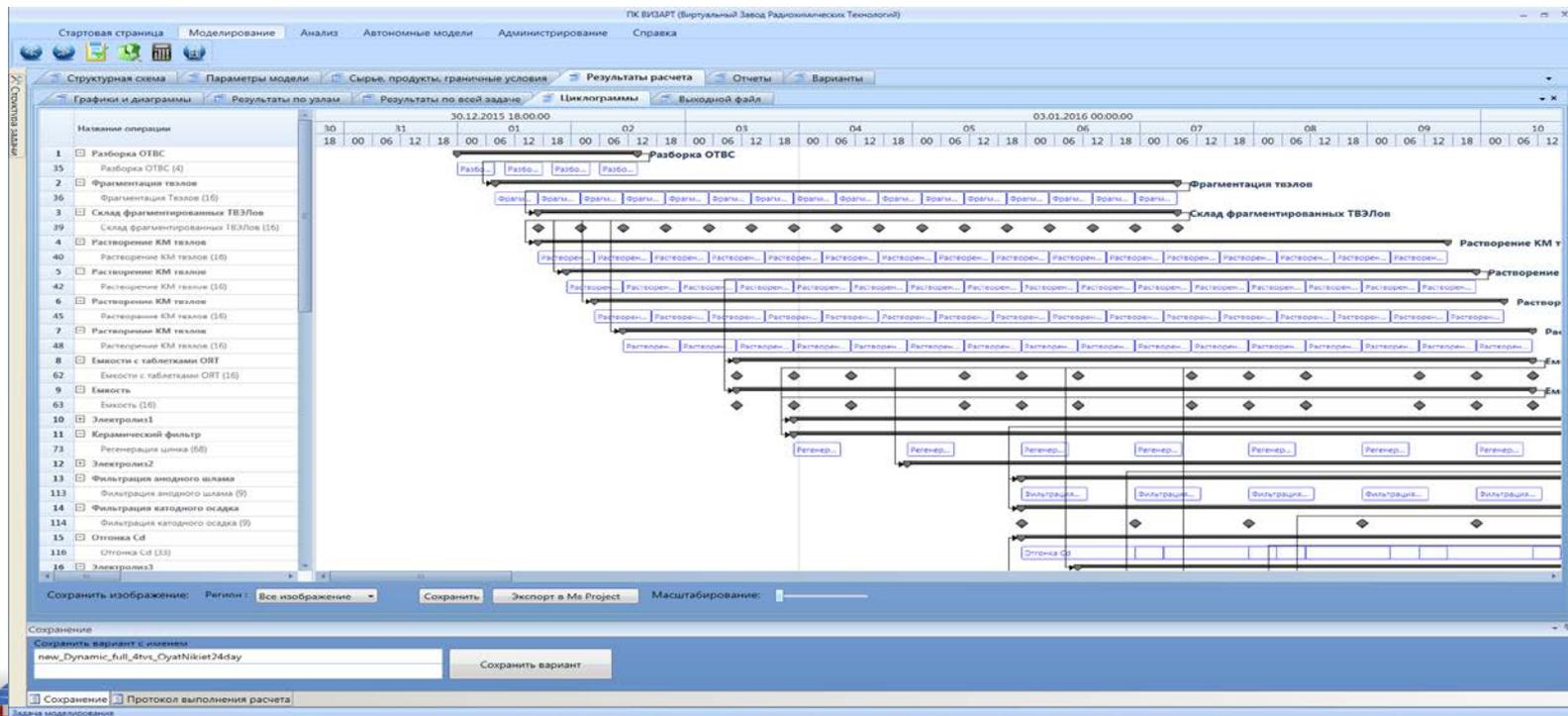
## Исходная информация:

- Описание техпроцесса (хим.реакции, эмпирические зависимости)
- Расходы материальных потоков рассчитаны в статическом режиме
- Периодичность и объем загрузки
- Длительность операции
- Производительность аппаратов

## Рассчитываемые характеристики

- Циклограмма работы узлов
- Объем промежуточных емкостей
- Потребность в тиражировании аппаратов
- Накопление ДМ в промежуточных емкостях и хранилищах, тепловыделение и активность

# Циклограмма модуля переработки



# Возможности динамической балансовой модели

Определение наиболее загруженные производственных участков и линий

Оценка необходимого количества единиц оборудования на отдельных операциях

Оценка необходимого количества единиц накопительных (промежуточных) емкостей для отдельных продуктов

Сравнение различных вариантов аппаратурно-технологической схемы с точки зрения длительности переработки партии ОЯТ

Оценка максимального единовременного содержания ядерных материалов в емкостях и аппаратах

Учет эволюции изотопного состава компонентов ОЯТ и, следовательно, изменение химических и радиационных свойств технологических продуктов

# Заключение



**Спасибо за  
внимание!**  
[\*i.r.makeyeva@vniitf.ru\*](mailto:i.r.makeyeva@vniitf.ru)